

SCI CELL

ODBORNÝ MAGAZÍN
WWW.SCICELL.ORG

2024

ISSN 2585-9137
Vydavateľstvo SciCell





Pulzné elektrické pole (PEF) ako perspektívna technológia spracovania potravín: inaktivácia mikroorganizmov a zachovanie kvality

Publikované 27. marca 2026

Juraj Čuboň, Miroslava Hlebová, Lukáš Hleba, Jana Tkáčová

Úvod

Udržateľnosť predstavuje jeden zo základných princípov moderného potravinárstva a zahŕňa sociálne, technologické aj ekonomické aspekty rozvoja spoločnosti (Arshad et al., 2021). Spotrebitelia v rozvinutých krajinách čoraz viac preferujú potraviny, ktoré sú nielen bezpečné, ale aj nutrične hodnotné a sensoricky kvalitné (Mak et al., 2020). V tomto kontexte sa výskum zameriava na inovatívne technológie, ktoré umožňujú zachovať kvalitu potravín pri súčasnom znížení energetickej náročnosti spracovania.

Jednou z perspektívnych metód netepelného spracovania je technológia pulzného elektrického poľa (PEF), ktorá sa vyznačuje schopnosťou efektívne inaktivovať mikroorganizmy pri minimálnom tepelnom zaťažení potraviny. Vďaka tomu dochádza k lepšiemu zachovaniu nutričných a sensorických vlastností v porovnaní s konvenčnými tepelnými procesmi (Manzoor et al., 2019). Z hľadiska environmentálneho aj ekonomického sa PEF javí ako progresívna technológia s významným aplikačným potenciálom v potravinárskom priemysle (Zeng et al., 2019).

Mechanizmus účinku PEF je založený na jave nazývanom elektroporácia. Pri pôsobení krátkych elektrických impulzov dochádza k narušeniu bunkovej membrány mikroorganizmov v dôsledku prekročenia kritického transmembránového potenciálu. V membráne sa vytvárajú póry, ktoré môžu byť dočasné (reverzibilná elektroporácia) alebo trvalé (ireverzibilná elektroporácia). V prípade ireverzibilnej elektroporácie dochádza k nevratnému poškodeniu bunky, čo vedie k jej inaktivácii. Tento mechanizmus predstavuje základ pre využitie PEF ako alternatívy k pasterizácii, najmä pri spracovaní tekutých potravín a inaktivácii enzýmov (Arshad et al., 2020).

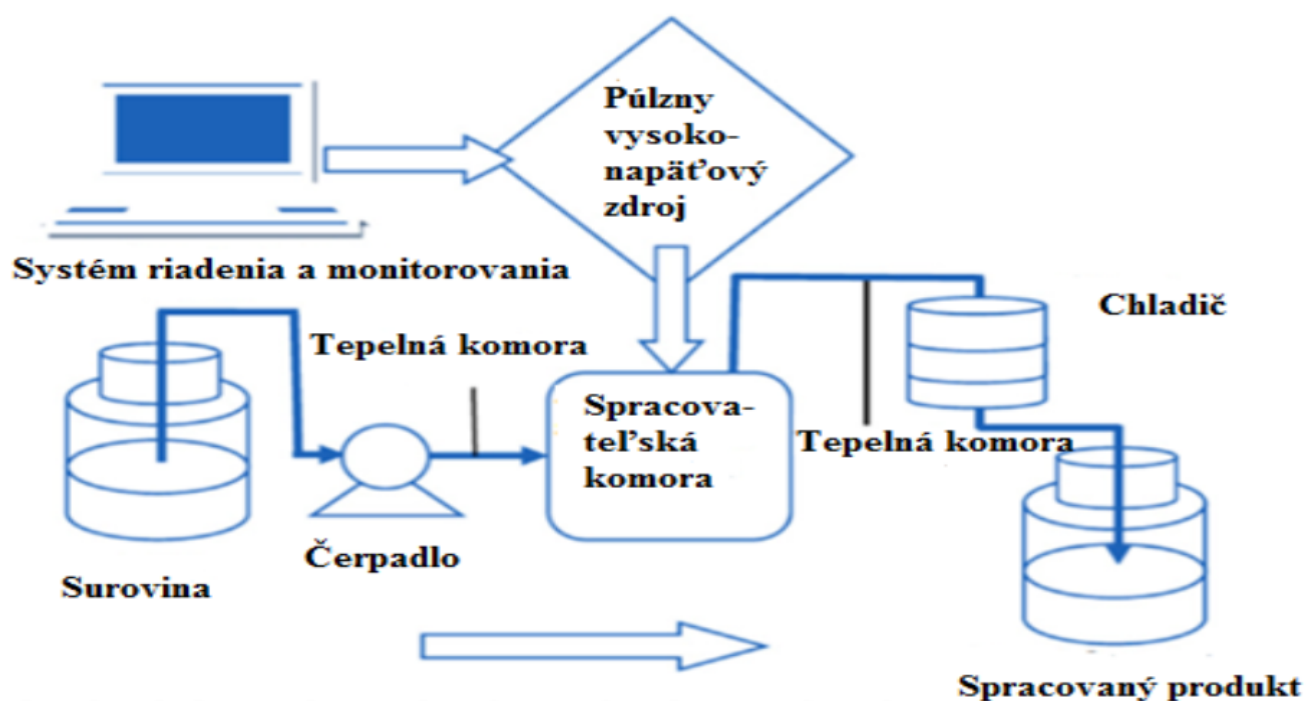
Inaktivácia mikroorganizmov v tekutých potravinách

Základným princípom technológie pulzného elektrického poľa (PEF) (obr. 1) je pôsobenie krátkych impulzov elektrického poľa v trvaní mikrosekúnd až milisekúnd, pri intenzite približne 10 – 80

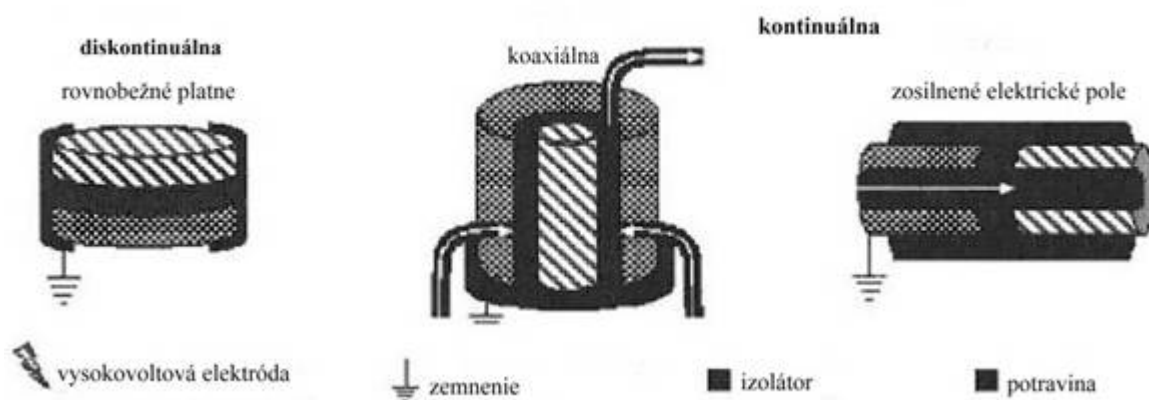
$\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$. Celkový účinok ošetrenia závisí najmä od počtu pulzov a dĺžky ich trvania. Proces prebieha v zariadení, kde potravina prúdi medzi elektródami, pričom aplikované elektrické pole preniká celým objemom produktu a spôsobuje inaktiváciu mikroorganizmov. Po ošetrení sa potravina zvyčajne asepticky balí a uchováva pri chladiarenských teplotách.

Schopnosť potravín prenášať elektrické impulzy je podmienená prítomnosťou iónov v ich štruktúre. Pri aplikácii PEF je elektrické pole distribuované prostredníctvom nabitých častíc do celého objemu suroviny, ako sú mlieko, ovocné šťavy, tekuté vajcia alebo homogenizované mäsové výrobky (Maged et al., 2012). Tento homogénny účinok predstavuje jednu z hlavných výhod technológie.

Účinnosť PEF pri inaktivácii mikroorganizmov bola potvrdená viacerými experimentálnymi štúdiami. Napríklad Cregenzán-Alberti et al. (2015) dosiahli významnú redukciu mikroorganizmov *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* a *Pseudomonas fluorescens* pri teplotách 20 - 45 °C, intenzite elektrického poľa 20 - 42,5 $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ a dĺžke impulzov 68 - 170 μs .



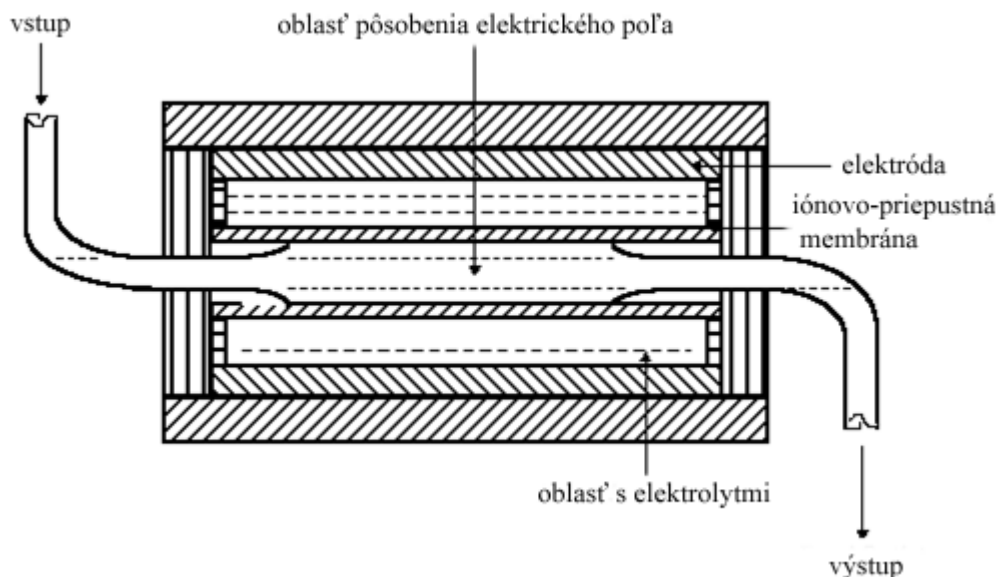
Obr. 1 Vývojový diagram systému spracovania potravín PEF so základnou zložkou (Maged et al., 2012).



Obr. 2 Formy komôr pulzného elektrického poľa (Jeyamkondan et al. 1999)

V priebehu vývoja technológie PEF vzniklo viacero konštrukčných riešení, pričom v súčasnosti sa ako najperspektívnejšie ukazujú kontinuálne systémy. Kontinuálna komora s iónovo vodivou membránou (obr. 2) pozostáva z dvoch paralelných elektród oddelených dielektrickým izolátorom. Elektródy sú od samotnej potraviny oddelené vodivými membránami, ktoré umožňujú prenos elektrického poľa bez priameho kontaktu s produktom. Na zabezpečenie elektrickej vodivosti sa využíva elektrolyt a iónovo permeabilné membrány (Jeyamkondan et al., 1999).

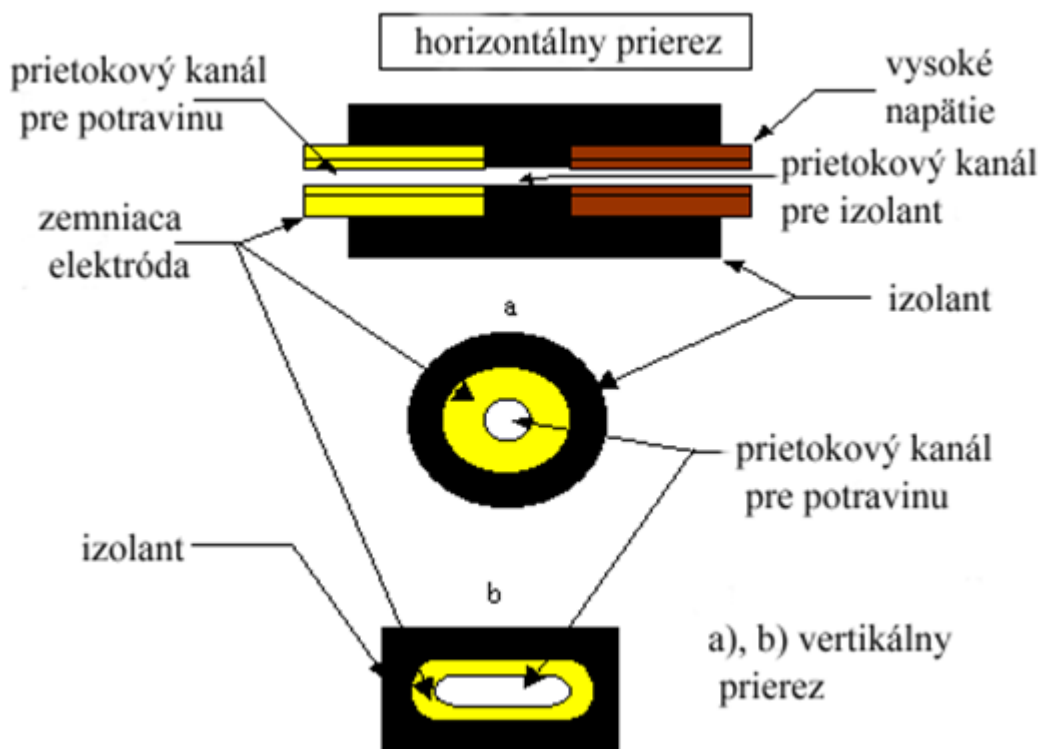
Modernejšie konštrukcie kontinuálnych komôr využívajú tzv. elektródové zóny namiesto klasických elektród (obr. 3). Tekuté potraviny sú v tomto prípade dopravované pod tlakom, pričom čas zdržania v systéme závisí od geometrie zariadenia a prietokových podmienok.



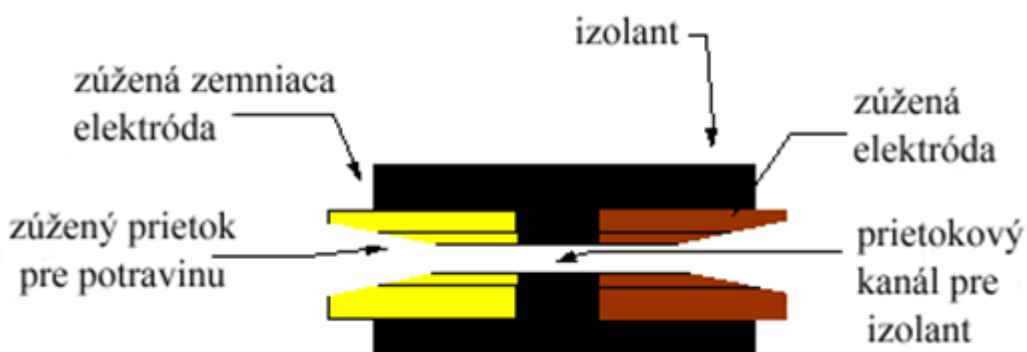
Obr. 3 Kontinuálna komora s iónovo vodivých membrán oddelujúcich elektródu a potraviny (Jeyamkondan et al. 1999)

Ďalším vývojovým stupňom sú komory so zosilneným účinkom elektrického poľa (obr. 4 a 5), ktoré využívajú modifikované geometrie elektród a izolátorov. Yin et al. (2014) použili napríklad kužeľové izolátory na elimináciu plynových bublín v oblasti pôsobenia elektrického poľa. Takéto konštrukčné riešenia umožňujú dosiahnuť rovnomernejšie rozloženie elektrického poľa a vyššiu účinnosť procesu.

Geometria prietokovej komory môže mať rôzne tvary (napr. kruhový alebo oválny prierez), čo ovplyvňuje hydrodynamiku prúdenia a distribúciu elektrického poľa (Barbosa-Canovas et al., 2010).



Obr. 4 Komora s využitím spolupôsobiaceho PEF (Barbosa-Canovas et al., 2010).



Obr. 5 Komora s rôznymi geometrickými tvarmi elektród pre zvýšenie účinnosti elektrických polí v kanáli izolátora (Barbosa-Canovas et al., 2010).

Experimentálne výsledky (Tab. 1 a Tab. 2) poukazujú na schopnosť technológie PEF dosiahnuť významnú redukciu mikroorganizmov v rôznych typoch potravín. Úroveň inaktivácie závisí od viacerých faktorov, najmä od intenzity elektrického poľa, počtu pulzov, teploty a typu ošetrovanej matrice. V mnohých prípadoch bolo dosiahnuté zníženie mikrobiálnej záťaže o niekoľko logaritmickej jednotiek, čo predstavuje významný technologický efekt.

Technológia PEF sa preto javí ako perspektívna alternatíva spracovania tekutých a polotekutých potravín, ako sú mlieko, jogurt, ovocné šťavy, polievky či tekuté vajcia. Významnou výhodou je vysoká účinnosť inaktivácie patogénnych mikroorganizmov pri minimálnom zvýšení teploty, čo umožňuje lepšie zachovanie kvality a nutričných vlastností potravín. V porovnaní s klasickou

pasterizáciou má PEF zároveň nižší environmentálny dopad.

Tabuľka 1. Vplyv PEF na inaktiváciu mikroorganizmov (**Barbosa-Canovas et al., 2010**).

Mikroorganizmus	Potravina	Redukcia v Log.	Pôsobenie v komore	Podmienky ošetrenia
<i>B. subtilis</i> spóry ATCC 9372	Hrášková polievka	5,3	C, coaxial, 0,51 / min	<5,5°C, 3,3 V/ μm , 2 μsec , 0,5 μF , 4,3 Hz, 30 pulzov,
<i>L. innocua</i>	Tekuté vajcia	3,4	C, 29 ml, d = 0,6 cm	26 to 36°C, 0,5 l/min 32 pulzov, 50 kV/cm 2 μsec , 3,5 Hz
<i>Listeria innocua</i>	SOM 0,2% tuku	2,6	C, = súosný, 29 ml, d=0,63 cm	15 to 28°C, 0,5 l/min, 100 pulzov, 50 kV/cm 0,5 μF , 2 μsec , 3,5 Hz
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	SOM 0,2% tuku	2,7	C, 29ml, d=0,63 cm	15 to 28°C, 0,5 l/min, 30 pulzov, 50 kV/cm 0,5 μF , 2 μsec , 4,0 Hz
<i>L. innocua</i>	SOM	2,4	C, súbežný, 29ml, d = 0,6 cm	22 to 34°C, 0,5 l/min 2 μs , 3,5 Hz 32 pulzov , 50 kV/cm
<i>Salmonella</i> Dublin	SOM	3,0	C, súbežne, pole	10 to 50°C, 15-40 kV/cm, 12-127 μs
<i>Salmonella</i> Dublin	mlieko	4,0	B paralelné platne	63°C, 3,67 V/ μm , 36 μsec , 40 pulzov
<i>Listeria monocytogenes</i> (scott A)	Pasterizované mlieko (3,5% tuku)	3,0-4,0	C, súbežný tok, 20 ml	10 to 50°C, 0,07l/s 30kV/cm, 1,5 μsec , 1,700 Hz bipolárne pulzy, t = 600 μsec
<i>Lactobacillus brevis</i>	jogurt	2,0	B, paralelné platne	50°C, 1,8 V/ μm
<i>Salmonella</i> Typhimurium	mlieko	5,0	B, d=6,35 mm	1 μsec , 20 pulzov, 83 kV/cm
<i>Pseudomonas fragi</i>	mlieko	4,5	B, d= 6,35 mm	9,0 V/ μm , 1 μsec , 10 of 6,8 V/ μm + 1 of 7,5 V/ μm +1 of 8,3 V/ μm + 5 of 9,0 V/ μm
<i>Lactobacillus brevis</i>	jogurt	2,0	B paralelné platne	50°C, 1,8 V/ μm

B- diskontinuálne; C- kontinuálne. d - priemer, SOM- Surové odstredené mlieko

Tabuľka 2 Inaktivácia *Saccharomyces cerevisiae* pomocou PEF (Barbosa-Canovas et al., 2010).

Potravina	Redukcia MO v Log.	Podmienky v komore	Podmienky ošetrenia
Tekuté vajcia	6,0	C, 11.9 ml, d = 0.6 cm, 0.5 l/min	<37°C; 2,6 V/μm; 4 μsec. 100 pulzov, farebné zmeny
Pomarančový džús	5,0	B, 25 ml, d = 0.5 cm,	0,675 V/μm, 5 pulzov
Jablkový džús	4,0	270 J/16 pulzov, B, paralelné platne,	<30°C, 1,2 V/μm, 20 16 pulzov
Jablkový džús	4,2	270 J/16 pulzov, B, paralelné plate	<30°C, 1,2 V/μm, 2016 pulzov,
Jablkový džús	4,0	260 J/16 pulzov, B, paralelné platne,	4-10°C, 1,2 V/μm, 90μsec, 616 pulzov,
Jablkový džús	3,5	260 J/16 pulzov, B, paralelné platne,, 25 ml, d= 0.95 cm	4-10°C, 1,2 V/μm, 60μsec, 6, 16 pulzov
Jablkový džús	3,0-4,0	558 J/16 pulz, B, paralelné platne, 25.7 ml, d= 0.95 cm	<25°C, 2.5 V/μm, 5 pulzov

B- diskontinuálne; C- kontinuálne. d – priemer

Limitujúcim faktorom technológie je nižšia účinnosť voči bakteriálnym spóram a niektorým enzýmom. Tento nedostatok je však možné eliminovať kombináciou PEF s ďalšími technologickými postupmi, napríklad miernym tepelným ošetrením (do približne 54 °C), použitím kyselín alebo iných baktericídnych faktorov (Maged et al., 2012).

Inaktivácia mikroorganizmov v pevných potravinách

Technológia pulzného elektrického poľa (PEF) nachádza uplatnenie nielen pri spracovaní tekutých, ale aj pevných potravín, kde prispieva k zlepšeniu štrukturálnych vlastností, fyzikálnej kvality a konzervácie produktov (Tapia et al., 2020).

Mechanizmus účinku PEF je aj v tomto prípade založený na elektroporácii, teda tvorbe pórov v bunkových membránach rastlinných, živočíšnych aj mikrobiálnych buniek. Narušenie bunkovej štruktúry vedie k zvýšeniu priepustnosti tkanív, čo umožňuje efektívnejší prenos hmoty a energie počas technologických operácií. V dôsledku toho je možné znížiť požadovanú teplotu spracovania a skrátiť jeho trvanie, najmä pri procesoch sušenia (Ostermeier et al., 2018).

Významný prínos technológie PEF bol preukázaný pri dehydratácii rastlinných materiálov. Napríklad mrkva pred upravená pomocou PEF ($5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, $8 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) vykazovala kratší čas sušenia v porovnaní s neošetrenými vzorkami (Liu et al., 2020). Podobne pri jablkách viedla aplikácia PEF ($800 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$) k lepšiemu zachovaniu tvaru produktu a skráteniu času sušenia až o 57 % (Lammerskitten et al., 2019). Pred úprava zemiakov pomocou PEF ($400 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$, 100 μs, 0,3 s) zároveň významne skrátila čas zmrazovania, približne o 65 % (Jalte et al., 2009).

Uplatnenie PEF sa ukazuje aj pri lyofilizácii potravín, kde prispieva k zníženiu energetickej náročnosti procesu. Pri lyofilizácii mäsa bolo pozorované nielen zníženie spotreby energie, ale aj zlepšenie textúry produktu, najmä jeho zmäkčenie (Clairand et al., 2020; Bekhit et al., 2014).

Uvedené výsledky naznačujú, že technológia PEF predstavuje perspektívny nástroj na optimalizáciu spracovania pevných potravín, a to nielen z hľadiska mikrobiálnej stability, ale aj zlepšenia technologických a kvalitatívnych vlastností produktov.

Zníženie produkcie 5-hydroxymetylfurfuralu (HMF)

Pri tepelnom spracovaní potravín dochádza k tvorbe 5-hydroxymetylfurfuralu (HMF), ktorý vzniká v dôsledku Maillardovej reakcie medzi aminokyselinami a karbonylovými zlúčeninami. Táto reakcia je síce dôležitá z hľadiska tvorby chuti a farby potravín, avšak vedie aj k vzniku nežiaducich látok. HMF

je považovaný za potenciálne karcinogénnu zlúčeninu a preto je jeho prítomnosť v potravinách predmetom intenzívneho výskumu (Khaneghah et al., 2020).

V tomto kontexte sa technológia pulzného elektrického poľa (PEF) javí ako perspektívna alternatíva k tepelnému spracovaniu, ktorá môže prispieť k obmedzeniu tvorby HMF. Predbežné štúdie naznačujú, že pred úprava potravín pomocou PEF môže významne redukovať vznik tejto zlúčeniny počas následného spracovania (Jaeger et al., 2010).

Konkrétne výsledky ukazujú, že aplikácia PEF viedla k zníženiu obsahu HMF v rôznych potravinách, napríklad v paradajkovej šťave o 7 %, v jahodovej šťave o 40 % a v melóne až o 80 % v porovnaní s klasickým tepelným spracovaním. Zníženie tvorby HMF bolo zaznamenané aj v datľovej šťave, približne o 12 % (Mtaoua et al., 2016).

Tieto výsledky poukazujú na potenciál technológie PEF nielen z hľadiska mikrobiálnej bezpečnosti, ale aj z pohľadu znižovania tvorby nežiaducich reakčných produktov vznikajúcich pri tepelnom spracovaní. Okrem toho aplikácia PEF, najmä v kombinácii s ďalšími technologickými postupmi, umožňuje efektívnu inaktiváciu mikroorganizmov pri súčasnom znížení environmentálnej záťaže.

Spracovanie potravín pomocou PEF je spojené s nižšou produkciou priemyselného odpadu, vyššou energetickou účinnosťou, úsporou vody a nízkymi až minimálnymi emisiami škodlivých plynov v porovnaní s konvenčnými technológiami. Z tohto hľadiska možno PEF považovať za významný nástroj smerujúci k udržateľnému potravinárstvu (Arshad et al., 2021).

Záver

Technológia pulzného elektrického poľa (PEF) predstavuje v potravinárskom výskume perspektívnu a ekonomicky zaujímavú alternatívu na predĺženie trvanlivosti potravín. Zatiaľ čo jej prvotné aplikácie boli zamerané najmä na spracovanie tekutých potravín, súčasný výskum poukazuje na rozširovanie jej využitia aj na ďalšie typy potravín a technologické operácie.

PEF umožňuje účinnú inaktiváciu mikroorganizmov pri minimálnom tepelnom zaťažení, čím prispieva k zachovaniu nutričnej a sensorickej kvality potravín. Limitom tejto technológie zostáva nižšia účinnosť voči niektorým mikroorganizmom, najmä bakteriálnym spóram a enzýmom. Tento nedostatok je však možné prekonať kombináciou PEF s ďalšími technologickými postupmi, napríklad miernym tepelným ošetrením.

Okrem mikrobiálnej inaktivácie sa technológia PEF uplatňuje aj pri znižovaní tvorby nežiaducich reakčných produktov, ako je 5-hydroxymetylfurfural (HMF), ako aj pri spracovaní vedľajších produktov a potravinárskych odpadov s cieľom zvýšiť ich využiteľnosť a kvalitu.

Súčasný poznatky naznačujú, že technológia PEF má potenciál stať sa významnou súčasťou moderného, udržateľného potravinárstva, ktoré kladie dôraz na kvalitu, bezpečnosť a environmentálnu efektívnosť spracovania potravín.

Literatúra

Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Munir, A., Buntat, Z., Ahmad, M. H., Jusoh, Y. M., ... & Aadil, R. M. (2020). Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. *Trends in food science & technology*, 104, 1-13.

Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., ... & Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 43-54.

Barbosa-Cánovas, G., & Bermudez-Aguirre, D. (2010). Pasteurization of milk with pulsed electric fields. In *Improving the safety and quality of milk* (pp. 400-419). Woodhead Publishing.

Bekhit, A. E. D. A., van de Ven, R., Suwandy, V., Fahri, F., & Hopkins, D. L. (2014). Effect of pulsed

electric field treatment on cold-boned muscles of different potential tenderness. *Food and Bioprocess Technology*, 7(11), 3136-3146.

Cregenzán-Alberti, O., Halpin, R. M., Whyte, P., Lyng, J. G., & Noci, F. (2015). Study of the suitability of the central composite design to predict the inactivation kinetics by pulsed electric fields (PEF) in *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas fluorescens* in milk. *Food and Bioprocess Technology*, 95, 313-322.

Jaeger, H., Janositz, A., & Knorr, D. (2010). The Maillard reaction and its control during food processing. The potential of emerging technologies. *Pathologie biologique*, 58(3), 207-213.

Jalte, M., Lanoiselle, J. L., Lebovka, N. I., & Vorobiev, E. (2009). Freezing of potato tissue pre-treated by pulsed electric fields. *LWT-Food Science and Technology*, 42(2), 576-580.

Jeyamkondan, S., Jayas, D. S., & Holley, R. A. (1999). Pulsed electric field processing of foods: a review. *Journal of food protection*, 62(9), 1088-1096.

Khaneghah, A. M., Gavahian, M., Xia, Q., Denoya, G. I., Roselló-Soto, E., & Barba, F. J. (2020). Effect of pulsed electric field on Maillard reaction and hydroxymethylfurfural production. In *Pulsed electric fields to obtain healthier and sustainable food for tomorrow* (pp. 129-140). Academic Press.

Lammerskitten, A., Mykhailyk, V., Wiktor, A., Toepfl, S., Nowacka, M., Bialik, M., ... & Parniakov, O. (2019). Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 57, 102211.

Liu CaiYun, L. C., Pirozzi, A., Ferrari, G., Vorobiev, E., & Grimi, N. (2020). Effects of pulsed electric fields on vacuum drying and quality characteristics of dried carrot.

Mak, T. M., Xiong, X., Tsang, D. C., Yu, I. K., & Poon, C. S. (2020). Sustainable food waste management towards circular bioeconomy: Policy review, limitations and opportunities. *Bioresource technology*, 297, 122497.

Manzoor, M. F., Zeng, X. A., Rahaman, A., Siddeeg, A., Aadil, R. M., Ahmed, Z., ... & Niu, D. (2019). Combined impact of pulsed electric field and ultrasound on bioactive compounds and FT-IR analysis of almond extract. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2355-2364.

Mohamed, M. E., & Eissa, A. H. A. (2012). Pulsed electric fields for food processing technology. In *Structure and function of food engineering*. IntechOpen.

Mtaoua, H., Elfalleh, W., Hannachi, H., Lachiheb, B., Yahia, L., & Ferchichi, A. (2016). Evaluation of nutritional quality and antioxidant activity of Tunisian date juices (*Phoenix dactylifera* L.). *Journal of New Sciences*, 27.

Tapia, M. S., Alzamora, S. M., & Chirife, J. (2020). Effects of water activity (aw) on microbial stability as a hurdle in food preservation. *Water activity in foods: Fundamentals and applications*, 323-355.

Ostermeier, R., Giersemehl, P., Siemer, C., Töpfl, S., & Jäger, H. (2018). Influence of pulsed electric field (PEF) pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. *Journal of Food Engineering*, 237, 110-117.

Yin, S., Chen, X., Hu, C., Zhang, X., Hu, Z., Yu, J., ... & Zheng, S. (2014). Nanosecond pulsed electric field (nsPEF) treatment for hepatocellular carcinoma: a novel locoregional ablation decreasing lung metastasis. *Cancer Letters*, 346(2), 285-291. Zeng, X. A., & Zhang, Z. (2019). Pulsed electric field assisted extraction of bioactive compounds. In *Advances in food processing technology* (pp. 125-135). Singapore: Springer Singapore.

Autori a afilácia:

prof. Ing. Juraj Čuboň, CSc., Ústav potravinárstva. Fakulta biotechnológie a potravinárstva. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre. T. A. Hlinku 2, 94676 Nitra, e-mail:

juraj.cubon@uniag.sk

Ing. Jana Tkáčová, PhD., Ústav potravinárstva. Fakulta biotechnológie a potravinárstva. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre. T. A. Hlinku 2, 94676 Nitra, e-mail: tkacova.jt@gmail.com

doc. Ing. Lukáš Hleba, PhD., [Ústav biotechnológie](#) Fakulta biotechnológie a potravinárstva. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre. T. A. Hlinku 2, 94676 Nitra, e-mail: lukas.hleba@uniag.sk

Ing. Miroslava Hlebová, PhD., Department of Biology, Faculty of Natural Sciences, University of SS. Cyril and Methodius, Nám. J. Herdu 2, 917 01 Trnava, Slovakia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1720-9981>